

ÉCOULEMENT DE L'EAU AU-DESSOUS D'UNE VANNE ET FORME RATIONNELLE DE LA SURFACE D'APPUI DE LA VANNE

ÉTUDE THÉORIQUE ET EXPÉRIMENTALE

(Suite)

par le Professeur Jean SMETANA

Ingénieur-Docteur de l'Université de Prague

III. — LES ESSAIS

18 — Groupage des essais

Afin de pouvoir grouper les essais de la manière la plus rationnelle, nous avons fait de nombreux essais préliminaires (1). Ceux-ci ont indiqué que les courbes d'écoulement et les coefficients de contraction dépendent :

(1) Je remercie les Ingénieurs L. LISTOVIO et J. GABELEK pour leur collaboration aux essais préliminaires; je remercie Jos. FRANCK, ingénieur et M. WEIGEL pour les mesures très minutieuses qu'ils ont faites lors des essais demandant de la précision; je remercie M. WEIGEL pour le travail pénible de calcul et de tracé graphique.

a) de la charge relative $h_1 = h : a$ et il y a lieu de distinguer

$$h_1 < 3,3$$

b) de la hauteur a de l'ouverture et il y a lieu de distinguer

$$a > 60 \text{ mm.}$$

Pour cette raison, j'ai groupé les essais en trois séries :

Série I. — Ecoulement par une ouverture de hauteur $a = 100 \text{ mm}$ pour $h_1 \geq 3,3$.

Série II. — Ecoulement par une ouverture de hauteur $a = 100 \text{ mm}$. pour $h_1 < 3,3$.

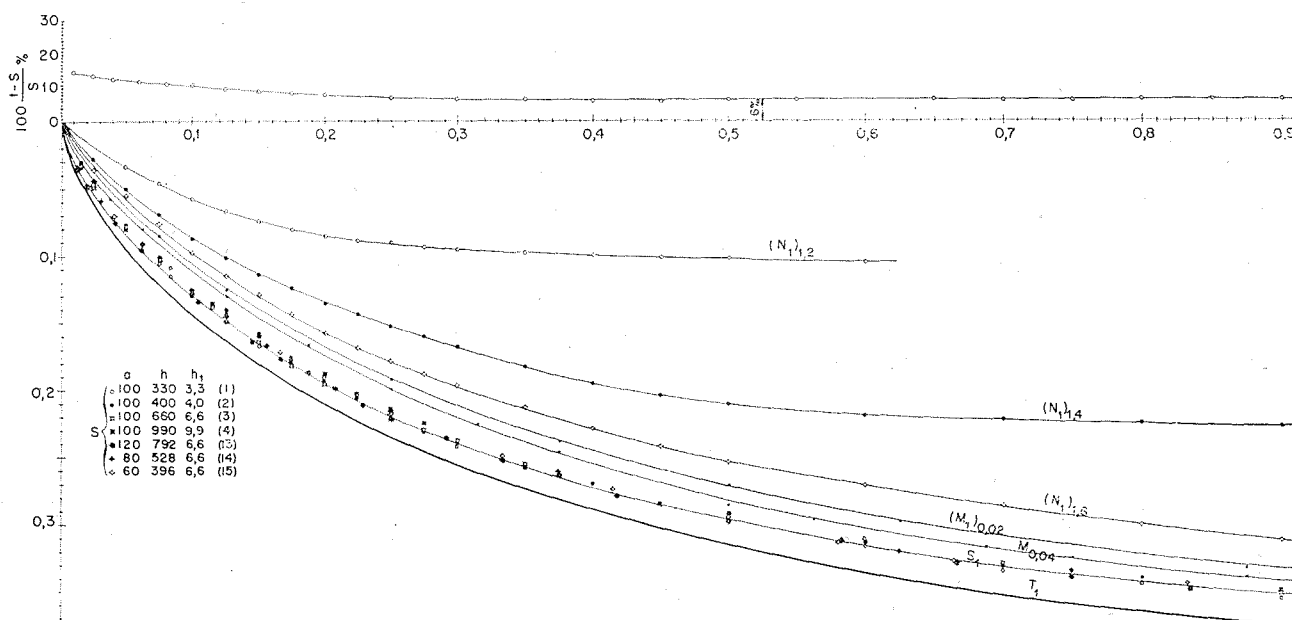


Fig. 12

La courbe théorique et la courbe réelle de l'écoulement.

Série III. — Ecoulement par une ouverture $a > 100$ mm. pour $h_1 = 6.6$.

Lors des essais de ces séries, les mesures ont été faites avec un soin particulier.

19 — Série d'essais I

Les essais de cette série concernent l'écoulement par une ouverture de hauteur constante $a = 100$ mm. pour une charge relative variable $h_1 > 3,3$.

La charge relative choisie pour l'essai 1 était $h_1 = 3,3$; pour l'essai 3 il a été choisi une charge relative deux fois plus grande, c'est-à-dire $h_1 = 6,6$ et pour l'essai 4 une charge relative trois fois plus grande, c'est-à-dire $h_1 = 9,9$. Ces données ainsi que les valeurs de h sont indiquées dans les premières colonnes du tableau « B ».

Plus la charge h_1 était grande, plus la surface d'eau sortant de dessous la vanne était tranquille et lisse et les mesures précises. Comme pour $h_1 = 3,3$ la surface de l'eau était assez mouvementée, on procéda dans cette série à l'essai 2 avec une charge relative voisine de 3,3 et cela avec $h = 4$, la surface de l'eau sortant de dessous la vanne étant, dans cet essai, plus tranquille.

Nous avons désigné par S les courbes d'écoulement « réelles » correspondantes. Nous avons choisi les abscisses et nous les avons mesurées au demi-mm. près ; nous avons mesuré leurs ordonnées s avec le plus grand soin, au dixième de mm. près, au moyen d'une pointe munie d'une échelle millimétrique avec vernier. Les

abscisses judicieusement choisies sont marquées en haut des colonnes du tableau « B » ; les ordonnées mesurées s des quatre essais de la série I sont indiquées en mm. dans les quatre premières lignes du même tableau.

Les ordonnées s_n du point le plus bas des courbes S sont indiquées dans le tableau B en gras et correspondent d'habitude à quelques-unes des valeurs de l'abscisse x_n . La valeur x_n la plus probable a été encore déterminée par tâtonnement à l'aide d'une pointe de mesure ; elle est portée dans le tableau « B » dans la colonne ayant en tête x_n .

Dans la colonne du tableau « B », on a porté le paramètre d'abscisse $\left(\frac{x_n}{a}\right)_s$ calculé du point le plus bas des courbes S. Dans la colonne suivante du tableau « B » est indiquée l'ordonnée $a - s_n$ calculée du point le plus bas de la courbe S mesurée depuis l'origine O_1 .

La dernière colonne contient les valeurs finales du coefficient de contraction α_s calculées suivant l'équation 57. Nous constatons qu'elles oscillent autour de la valeur $\alpha_s = 0,64$.

Nous étudierons l'allure générale des courbes S en même temps que celle des courbes des autres essais.

On n'a plus fait de mesures sur l'eau après le point le plus bas des courbes S.

20 — Série d'essais II

Dans cette série d'essais nous avons maintenu constante la hauteur d'ouverture $a = 100$ mm., mais nous faisons varier la valeur de la charge relative au-dessous de la valeur 3,3, c'est-à-dire $h_1 < 3,3$.

TABLEAU B

Les ordonnées s, n, m, en mm. des courbes de contraction S, N, M.

Ligne	Série	Essais	Courbe	a mm	h mm	$h_1 = \frac{h}{a}$	aux abscisses x égales en mm. à :							
							x	1.5	2.5	5.0	7.5	10.00	11.5	12.5
1	I	1	S	100	330	3.3	s	3.3	4.7	8.0	10.5	12.5	—	14.4
2		2	S	100	400	4.0	s	3.1	4.4	7.7	10.1	12.5	13.4	—
3		3	S	100	660	6.6	s	3.4	4.8	7.8	10.2	12.9	13.7	14.3
4		4	S	100	990	9.9	s	3.0	4.5	7.7	10.3	12.6	13.5	14.1
5	II	5	N	100	120	1.2	n	—	—	3.4	4.6	5.8	—	6.7
6		6	N	100	140	1.4	n	—	2.8	5.0	6.9	9.7	—	10.1
7		7	N	100	160	1.6	n	—	3.6	5.5	7.6	9.8	—	11.4
8	III	13	S	120	792	6.6	s	4.2	5.7	9.0	11.5	13.8	—	16.0
9		14	S	80	528	6.6	s	—	4.7	7.3	—	11.6	—	13.3
10		15	S	60	396	6.6	s	—	4.2	6.5	—	10.3	—	—
11		16	M	40	264	6.6	m	2.3	3.2	5.2	6.6	7.9	—	8.9
12		18	M	20	132	6.6	m	1.7	2.5	3.8	4.7	5.3	—	5.8

Ligne	aux abscisses x égales en mm. à :													
	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0	27.5	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	60.0	70.0	80.0
1	16.5	—	19.0	—	—	—	23.9	—	26.6	—	29.2	30.9	32.5	33.3
2	15.9	17.7	19.1	20.4	21.7	22.8	23.8	25.4	26.6	28.0	29.1	30.6	32.2	32.9
3	16.3	18.0	19.3	20.3	21.5	22.7	23.5	25.2	26.6	28.0	28.9	30.4	32.0	32.9
4	15.8	17.5	18.8	20.1	21.2	22.2	23.5	25.2	26.6	27.9	28.7	30.4	32.1	32.9
5	7.4	8.0	8.5	8.8	9.0	9.3	9.5	9.7	9.8	9.9	10.0	10.1	9.7	—
6	11.3	12.3	13.4	14.2	15.1	15.8	16.6	18.0	19.2	20.0	20.6	21.3	21.5	21.6
7	12.8	14.2	15.6	16.7	17.7	18.6	19.4	21.0	22.5	23.7	24.8	26.4	27.8	29.0
8	17.7	19.6	21.0	22.3	23.7	25.1	26.3	28.0	29.9	31.2	32.9	35.1	36.5	28.3
9	—	—	17.1	—	—	—	20.7	—	23.3	—	24.9	26.0	—	27.7
10	12.9	—	14.8	—	16.2	—	17.3	18.4	19.1	19.6	19.9	20.9	21.2	21.4
11	9.7	10.4	11.2	11.6	11.9	12.3	12.6	13.1	13.5	13.7	13.9	14.1	14.2	14.2
12	6.1	6.4	6.55	6.7	6.75	6.8	6.8	6.8	—	—	—	—	—	—

Ligne	aux abscisses x égales en mm. à :								Le point le plus bas de la courbe			
	90	100	120	140	160	180	200	250	x_n	x_n/a	$a - s_n$	α_s
1	34.2	34.8	35.7	36.0	36.4	—	—	—	165	1.65	63.6	0.636
2	33.7	34.4	35.0	35.7	36.2	36.4	36.4	36.4	173	1.73	63.6	0.636
3	33.8	34.3	36.1	35.6	35.7	35.8	35.8	—	175	1.75	64.2	0.642
4	33.6	34.3	35.0	35.5	35.6	35.7	35.7	35.7	168	1.68	64.3	0.643
5	—	—	—	—	—	—	—	—	55	0.55	89.8	0.898
6	21.7	21.6	—	—	—	—	—	—	90	0.90	78.3	0.783
7	30.0	30.6	30.8	30.8	—	—	—	—	120	1.20	69.2	0.692
8	39.5	40.4	—	—	surface de l'eau très agitée			34.2	205	1.70	76.8	0.640
9	—	28.9	29.1	29.1	—	—	—	—	137	1.71	50.9	0.636
10	—	21.7	21.7	—	—	—	—	—	100	1.67	38.3	0.638
11	—	—	—	—	—	—	—	—	67	1.675	25.8	0.645
12	—	—	—	—	—	—	—	—	28	1.40	13.2	0.660

Nous avons choisi pour les essais 5, 6, 7, les charges relatives progressives 1,2 - 1,4 - 1,6 - comme il est signalé dans les lignes 5, 6, 7 du tableau B.

Nous désignons par N les courbes d'écoulement correspondant aux « faibles » charges relatives et par n leurs ordonnées mesurées depuis l'origine des axes O_2 vers le bas.

Les coordonnées du point le plus bas des courbes N sont x_n et n_n ; elles étaient mesurées d'une manière analogue aux coordonnées x_n , s_n . Les valeurs maxima de n_n sont indiquées dans le tableau B en gras.

Plus loin, dans les dernières colonnes sont indiquées les valeurs calculées $a - n_n$ et

$$\alpha = \frac{a - n_n}{a} \tag{61}$$

Ensuite nous remarquons que $\alpha_n > \alpha_s$; la

valeur α_n diffère de la valeur α_s d'autant plus que la charge relative h_1 est plus faible.

D'autre part, nous avons effectué les essais 8 à 12 dans la même série pour les charges relatives 1,8 - 2,0 - 2,25 - 2,5 - 2,75.

Avec ces valeurs de h_1 l'écoulement est très agité et les mesures sont difficiles à faire. L'oscillation de la surface dans cet intervalle est due surtout à ce que la surface est percée par des vortex qui amènent de l'air dans le courant sortant de dessous la vanne et diminuent localement la pression h_1 , de sorte que le mouvement est pulsatoire et instable.

Pour cette raison nous n'avons mesuré dans les essais 8 à 12 que les valeurs moyennes probables x_n et n_n . Ces mesures sont rapportées dans le tableau C. Les valeurs calculées α_n qui y figurent confirment l'accroissement de α_n avec l'abaissement de la valeur h_1 .

TABLEAU C. — Les coordonnées du point le plus bas et le coefficient de contraction des courbes N, M.

Ligne	Série	Essai	Courbe	a mm.	h mm.	$h_1 =$ h/a	Le point le plus bas de la courbe				REMARQUE
							x_{11}	x_{11}/a	$a - n_{11}$ $a - m_{11}$	α_{11} α_{m1}	
1	II	8	N	100	180	1.8	138	1.38	67.2	0.672	(+) La valeur x_{11} n'a pas pu être mesurée avec une précision suffisante.
2		9	N	100	200	2.0	150	1.50	66.0	0.660	
3		10	N	100	225	2.25	(+)		65.0	0.650	
4		11	N	100	250	2.5	(+)		64.4	0.644	
5		12	N	100	275	2.75	(+)		64.1	0.641	
6	III	17	M	30	198	6.6	47	1.57	19.5	0.650	
7		19	M	10	66	6.6	11.5	1.15	6.8	0.680	
8		20	M	5	33	6.6	(+)		3.8	0.760	

Les valeurs α_{11} et α_s des séries d'essais I et II ont été portées sur la fig. 13 en abscisses et les valeurs h_1 en ordonnées. La courbe correspondante est presque une droite dans sa partie α_{11} jusqu'au point ($\alpha_{11} = 1$ $h_1 = 1$) ; la partie α_{11} pour $h_1 \geq 3,3$ est pratiquement une droite parallèle à l'axe des h_1 pour $\alpha_s = 0,64$. La partie transitoire entre les limites $1,5 < h_1 < 3,3$ a une forte courbure.

Pour $h_1 = 1 \quad 1,2 \quad 1,4 \quad 1,57$
 Koch trouve $\alpha_{11} = 1 \quad 0,75 \quad 0,606 \quad 0,56$
 Smetana trouve expérimentalement $\alpha_{11} = 1 \quad 0,898 \quad 0,782 \quad 0,692$

21 — Série d'essais III

Dans les essais de cette série nous avons étudié l'influence de la hauteur d'ouverture a variable avec une valeur constante de la charge relative $h_1 = 6,6$.

Dans l'essai 13 nous avons choisi $a > 100$ mm, à savoir $a = 120$ mm. Les résultats sont enregistrés dans le tableau B à la ligne 8. La courbe correspondante est marquée S et le coefficient de contraction α_s a la valeur 0,640.

Nous n'avons pas pu augmenter davantage la hauteur a dans notre canal d'essais, car l'alimentation en eau ne pouvait pas fournir un débit plus grand.

Abaissons la hauteur a au-dessous de $a = 100$ mm., à savoir à 80 mm. et 60 mm. Les résultats de ces essais 14 et 15 sont consignés dans le tableau B aux lignes 9 et 10. Les courbes y sont désignées par S et le coefficient de contraction α_s a les valeurs 0,636 et 0,638.

Réduisons la hauteur a dans les essais 16 et 18, à 40 mm. et 20 mm. Les résultats sont indiqués aux lignes 11 et 12 du tableau B. Les courbes correspondantes sont de nature différente des courbes S ; appelons les M comme courbes d'écoulement par des « petites » ouvertures.

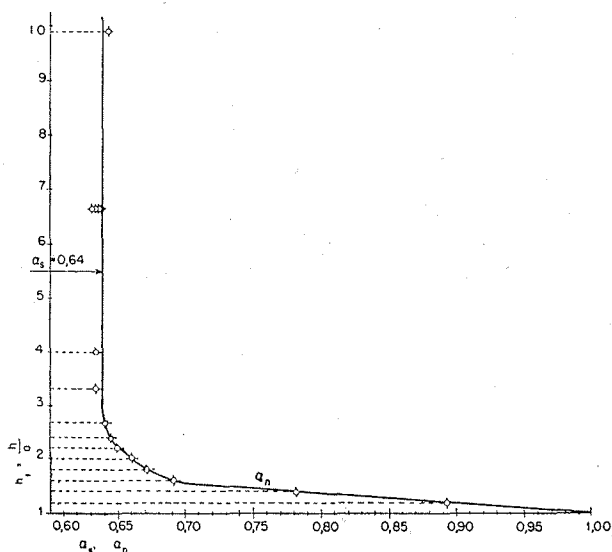


Fig. 13

Coefficient de contraction pour les grandes ouvertures aux différentes charges relatives.

Comparons les valeurs α_{11} calculées par KOCH (14) avec les valeurs α_{11} suivant notre graphique.

Leurs ordonnées sont m et les coordonnées de leur point le plus bas sont x_n et m_n .

Le coefficient de contraction

$$\alpha_M = \frac{a - m_n}{a} \quad (62)$$

croît au-dessus de la valeur α_s .

Afin d'avoir davantage de valeurs α_M , nous avons effectué encore les essais 17, 19 et 20 pour les hauteurs d'ouverture a de 30 mm., 10 mm., et 5 mm. Pendant ces essais, nous n'avons mesuré que les coordonnées x_n et m_n . Les résultats sont indiqués dans le tableau C aux lignes 6, 7 et 8.

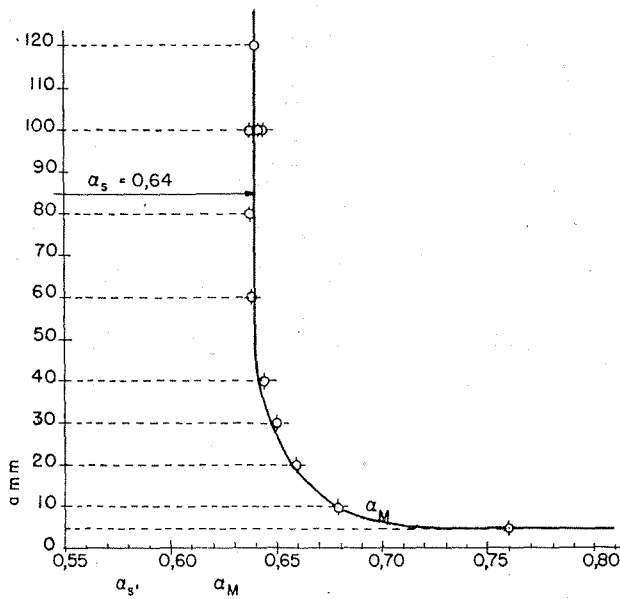


Fig. 14

Coefficient de contraction pour grandes et petites ouvertures aux grandes charges relatives.

Nous avons porté sur la fig. 14 en abscisses les valeurs α_s et α_M et en ordonnées les valeurs a . La courbe montre clairement que les valeurs du coefficient de contraction croissent lorsque la hauteur d'ouverture a diminue et cela particulièrement au-dessous de la valeur $a = 60$ mm.

22 — Indications résultantes sur le coefficient de contraction.

Nous voyons d'après les figures 13 et 14 :

1 — Pour $a \geq 60$ mm. et pour $h_1 \geq 3,3$ on a $\alpha_s = 0,64$ (63)

Enoncé 16 : Pour les ouvertures de 60 mm. et plus et pour les charges relatives de 3,3 et plus, la valeur du coefficient de contraction est en chiffre rond 0,64.

2 — Pour $a \geq 60$ mm. et pour $3,3 \geq h_1 \leq 1$ on a $0,64 \leq \alpha_n \leq 1$ (64)

Enoncé 17 : Pour les ouvertures de 60 mm. et plus et pour la charge relative h_1 diminuant de 3,3 à 1, la valeur du coefficient de contraction croît de 0,64 à 1.

3 — Pour 60 mm. $\geq a \geq 0$ mm. et pour $h_1 \geq 3,3$ on a $\alpha_M \geq 0,64$ (65)

Enoncé 18 : Pour les charges relatives de 3,3 et plus et pour les ouvertures diminuant de hauteur a de 60 mm. à 0 mm., la valeur du coefficient de contraction croît au-dessus de 0,64.

4 — $\alpha_s > \alpha_T$
 $\alpha_N > \alpha_S$
 $\alpha_M > \alpha_S$ (66)

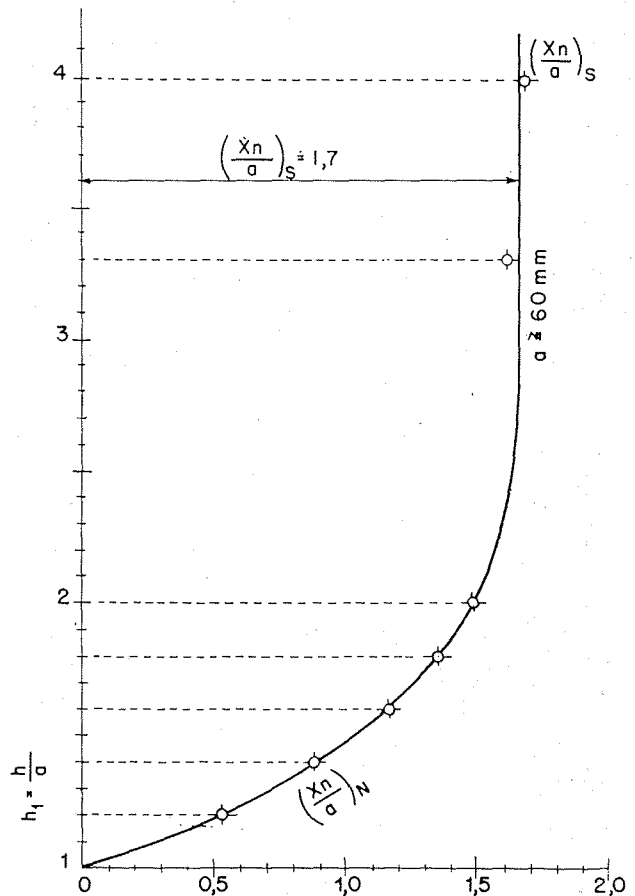


Fig. 15

Abscisse du point le plus bas des courbes d'écoulement pour grandes ouvertures aux différentes charges relatives.

Enoncé 19 : La valeur théorique des coefficients de contraction est inférieure à la valeur des coefficients de contraction réels. Parmi ceux-ci, le coefficient qui a la plus faible valeur est celui qui correspond à des ouvertures de 60 mm.

de hauteur et plus et à des charges relatives de 3,3 et plus.

23 — L'abscisse du point le plus bas des courbes d'écoulement

Les tableaux B et C donnent les paramètres d'abscisses calculés d'après les essais des séries I et II pour les points les plus bas des courbes S et N, c'est-à-dire :

$$\left(\frac{x_n}{a}\right)_S \quad \text{et} \quad \left(\frac{x_n}{a}\right)_N$$

Nous avons tracé sur la fig. 15 la relation entre ces paramètres et la charge relative h_1 .

Elle nous montre que :

pour la courbe S, c'est-à-dire pour $h_1 \geq 3,3$, on a

$$\frac{x_n}{a} = \text{constante} = 1,7 \quad (67)$$

pour la courbe N, c'est-à-dire pour

$$1 \leq h_1 \leq 3,3, \text{ on a :}$$

$$0 \leq \left(\frac{x_n}{a}\right)_N \leq 1,7 \quad (68)$$

De même on a calculé pour les essais de la série III les paramètres d'abscisse $\left(\frac{x_n}{a}\right)_M$ pour

les courbes M et on les a portés dans les tableaux B et C. A l'aide de ces paramètres

et des paramètres $\left(\frac{x_n}{a}\right)_S$ traçons alors pour

$h_1 \geq 3,3$ une courbe sur la fig. 16. Celle-ci donne :

pour $h_1 \geq 3,3$ et pour les courbes S c'est-à-dire

pour $a \geq 60$ mm. :

$$\left(\frac{x_n}{a}\right)_S = \text{constante} = 1,7 \quad (69)$$

pour les courbes M c'est-à-dire pour

$$0 < a < 60 \text{ mm.}, \text{ on a :}$$

$$0 \leq \left(\frac{x_n}{a}\right)_M = 1,7 \quad (70)$$

Enoncé 20 : L'abscisse du point le plus bas des courbes d'écoulement est :

pour les courbes S, 1,7 fois plus grande que la hauteur d'ouverture.

pour les courbes N diminue avec la charge relative jusqu'à 0 pour $h_1 = 1$,

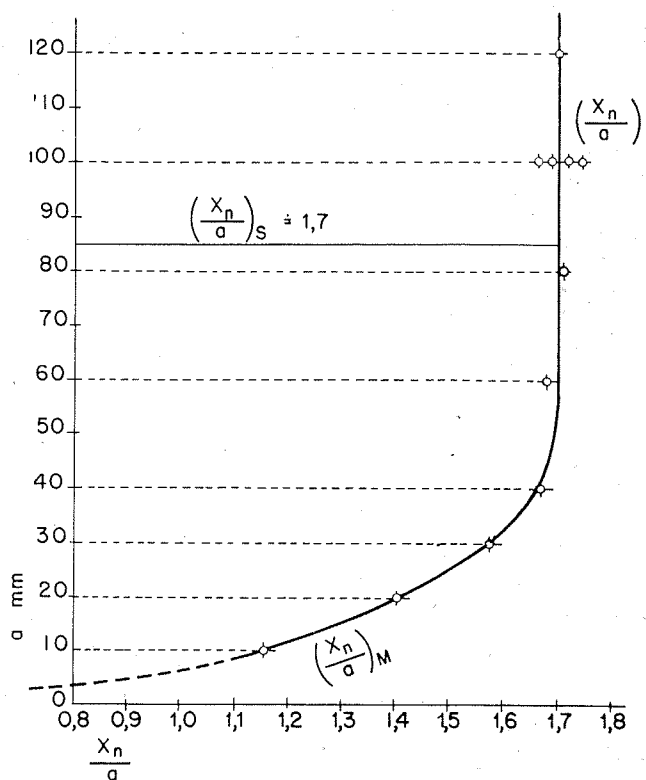


Fig. 16

Abcisse du point le plus bas des courbes d'écoulement pour grandes et petites ouvertures aux grandes charges relatives.

pour les courbes M diminue avec la hauteur d'ouverture tendant vers 0 pour $a = 0$.

24 — Les courbes d'écoulement S c'est-à-dire par les grandes ouvertures et pour des grandes pressions.

Les courbes d'écoulement S, N, M sont soumises à des relations semblables à celles des coefficients de contraction α_s, α_N et α_M .

Examinons tout d'abord la relation des courbes S d'une part avec la charge relative h_1 et, d'autre part, avec la grandeur a de l'ouverture.

Dans ce but, calculons à l'aide des grandeurs des coordonnées x et s indiquées dans le tableau B, les paramètres :

$$x_1 = \frac{x}{a} \quad \text{et} \quad s_1 = \frac{s}{a}$$

pour l'ouverture de la vanne $a = 1$ m et notons-les dans le tableau D.

Portons les points (x_1, s_1) sur la fig. 12 en datant du même signe tous ceux qui correspondent à une ligne du tableau D.

Les points ainsi marqués d'après tous les sept essais donnés, indiquent avec une dispersion tout

Tab. D. — Les coordonnées des courbes de contraction en mm. calculées pour l'ouverture de la vanne $a = 1$ m.

Ligne	Série	Essai	Courbe	Valeur initiale		Abscisse x_1 , ordonnée s_1, n_1												
				a mm	$h_1 = h_0 a$	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1.	I	1.	S	100	3,3	x_1 15	25	50	75	100	125	150	200	300	400	500	600	
						s_1 33	47	80	105	127	144	165	190	239	266	292	309	
2.		2.	S	100	4,0	x_1 15	25	50	75	100	115	150	175	200	225	250	275	
							s_1 31	44	77	101	125	134	159	177	191	204	217	228
3.	I	3.	S	100	6,6	x_1 15	25	50	75	100	115	125	150	175	200	225	250	
							s_1 34	48	78	102	129	137	143	163	180	193	203	215
4.	I	4.	S	100	9,9	x_1 15	25	50	75	100	115	125	150	175	200	225	250	
							s_1 30	45	77	103	126	135	141	158	175	188	201	212
5.	II	5.	N	100	1,2	x_1 50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	350	
						n_1 34	46	58	67	74	80	85	88	90	93	95	97	
6.		6.	N	100	1,4	x_1 25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	
							n_1 28	50	69	87	101	113	123	134	142	151	158	166
7.	II	7.	N	100	1,6	x_1 25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	
							n_1 36	55	76	98	114	128	142	156	167	177	186	194
8.	III	13.	S	120	6,6	x_1 12,5	20,8	41,6	62,5	83,3	104,2	125	145,8	166,7	187,5	208,3	229,2	
						s_1 35,0	47,5	75,0	95,8	115,0	133,3	147,5	163,3	175,0	185,8	197,5	209,2	
9.		14.	S	80	6,6	x_1 31,3	62,5	125,0	156,3	250,0	375,0	500,0	625,0	750,0	1000,0	1250,0	1500,0	
							s_1 58,8	91,3	145,0	166,3	213,8	258,8	291,3	311,3	325,0	346,3	355,0	361,3
10.	III	15.	S	60	6,6	x_1 41,7	83,3	166,7	250,0	333,3	416,7	500,0	583,3	666,7	750,0	833,3	1000,0	
							s_1 70,0	108,3	171,7	215,0	246,7	270,0	288,3	306,7	318,3	326,7	331,7	318,3

Ligne	Abscisse x_1 , ordonnée s_1, n_1																
	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1.	700	800	900	1000	1200	1400	1600										
	325	333	342	348	357	360	364										
2.	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2500	
	238	254	266	280	291	306	322	329	337	344	350	357	362	364	364	364	
3.	275	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1000	1200	1400	1600	1800	2000	
	227	235	252	266	280	289	304	320	329	338	343	351	356	357	358	358	
4.	275	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2500
	222	235	252	266	279	287	304	321	329	336	343	350	355	356	357	357	357
5.	400	450	500	600	700												
	98	99	100	101	97												
6.	350	400	450	500	600	700	800	900	1000								
	180	192	200	206	213	215	216	217	216								
7.	350	400	450	500	600	700	800	900	1000	1200	1400						
	210	225	237	248	264	278	290	300	306	308	308						
8.	250	291,7	333,3	375	416,7	500,0	583,3	666,7	750,0	833,3						2083,3	
	219,2	233,3	249,2	260,0	274,2	292,5	304,2	319,2	329,2	336,7						360,0	
9.	1750,0	2000,0															
	363,8	363,8															
10.	1166,7	1333,3	1666,7	2000,0													
	353,3	356,7	361,7	361,7													

TABLEAU E. — Paramètres de coordonnées des courbes d'écoulement T_1 , S_1 , $(N_1)_{1,2}$, $(N_1)_{1,4}$, $(N_1)_{1,6}$ c'est-à-dire pour l'ouverture de la vanne $a_1 = 1$ m.

x_1	0	0.005	0.010	0.025	0.040	0.060	0.080	0.100
t_1	0	0.0221	0.0344	0.0618	0.0828	0.1057	0.1253	0.1428
s_1	0	0.0190	0.0300	0.0545	0.0735	0.0945	0.1129	0.1290
$(n_1)_{1,2}$	0	0.0044	0.0085	0.0194	0.0285	0.0394	0.0490	0.0579
$(n_1)_{1,4}$	0	0.0069	0.0129	0.0280	0.0417	0.0581	0.0728	0.0863
$(n_1)_{1,6}$	0	0.0083	0.0152	0.0329	0.0479	0.0660	0.0828	0.0975
$100 \frac{t_1 - s_1}{s_1} \%$	0	16.3	14.7	13.4	12.6	11.8	11.0	10.7

x_1	0.125	0.150	0.175	0.200	0.250	0.300	0.350	0.400	0.450
t_1	0.1621	0.1792	0.1943	0.2079	0.2318	0.2522	0.2692	0.2842	0.2969
s_1	0.1479	0.1645	0.1795	0.1935	0.2175	0.2375	0.2539	0.2685	0.2806
$(n_1)_{1,2}$	0.0669	0.0740	0.0800	0.0850	0.0910	0.0945	0.0967	0.0984	0.0993
$(n_1)_{1,4}$	0.1010	0.1133	0.1242	0.1339	0.1510	0.1664	0.1806	0.1920	0.2002
$(n_1)_{1,6}$	0.1142	0.1286	0.1433	0.1560	0.1777	0.1953	0.2111	0.2250	0.2378
$100 \frac{t_1 - s_1}{s_1} \%$	9.6	8.9	8.2	7.4	6.6	6.2	6.0	5.8	5.8

x_1	0.500	0.550	0.600	0.650	0.700	0.750	0.800	0.850	0.900
t_1	0.3091	0.3182	0.3278	0.3351	0.3413	0.3460	0.3518	0.2562	0.3603
s_1	0.2910	0.3005	0.3085	0.3160	0.3225	0.3275	0.3315	0.3355	0.3391
$(n_1)_{1,2}$	0.1002	0.1010							
$(n_1)_{1,4}$	0.2060	2.2102	0.2130	0.2143	0.2153	0.2161	0.2165	0.2170	0.2170
$(n_1)_{1,6}$	0.2480	0.2569	0.2640	0.2711	0.2780	0.2842	0.2900	0.2952	0.3000
$100 \frac{t_1 - s_1}{s_1} \%$	6.2	5.9	6.3	6.0	5.8	5.9	6.2	6.2	6.3

x_1	0.950	1.000	1.100	1.200	1.300	1.400	1.500	1.750	2.000
t_1	0.3639	0.3669	0.3722	0.3761	0.3794	0.3812	0.3828	0.3858	0.3870
s_1	0.3425	0.3455	0.3505	0.3535	0.3565	0.3580	0.3590	0.3605	
$(n_1)_{1,2}$									
$(n_1)_{1,4}$									
$(n_1)_{1,6}$	0.3038	0.3060	0.3075	0.3080					
$100 \frac{t_1 - s_1}{s_1} \%$	6.2	6.2	6.2	6.4	6.4	6.5	6.6	7.0	

à fait insignifiante, une courbe unique S_1 . Celle-ci est tracée plutôt comme une enveloppe inférieure de tous les points marqués que comme une courbe moyenne. Cette manière de procéder découle du sens du problème étudié.

La courbe S_1 représente donc la courbe d'écoulement pour l'ouverture de la vanne $a = 1$ m. Nous traçons avec des ordonnées en grandeurs réelles et en déduisons les valeurs des ordonnées s_1 pour les valeurs convenablement arrondies des abscisses x_1 ; ces chiffres sont indiqués dans le tableau E.

Pour une ouverture arbitrairement choisie a , par exemple, pour $a = 2$ m. ou 0.5 m.; nous calculons les coordonnées en mètres de la courbe correspondante S_2 ou $S_{0,5}$ en multipliant les paramètres x_1 et s_1 du tableau E par le coefficient 2 ou 0.5.

Enoncé 21 : Les courbes d'écoulement S , c'est-à-dire pour ouvertures de 60 mm. et plus avec une charge relative de 3,3 et plus, sont semblables proportionnellement à la hauteur de l'ouverture.

Enoncé 22 : D'une courbe expérimentale S on peut déduire par similitude géométrique suivant la hauteur d'ouverture la courbe S pour une ouverture quelconque plus grande que 60 mm.; nous extrapolons ou interpolons les courbes S pour différentes ouvertures a de la vanne par un procédé graphique identique à celui qui a été donné au paragraphe 12 pour la courbe T.

25 — Les courbes d'écoulement N c'est-à-dire pour les grandes ouvertures et les faibles charges

Calculons les paramètres d'ordonnée $\left(\frac{x}{a}\right)_N$

et $\left(\frac{n}{a}\right)_N$ d'après les indications du tableau B pour $a = 1$ m. Traçons sur la figure 12 à l'aide de ces points la courbe N .

Pour $h_1 = 1,2$ on trouve la courbe $(N_1)_{1,2}$

Pour $h_1 = 1,4$ la courbe $(N_1)_{1,4}$ et pour $h_1 = 1,6$ la courbe $(N_1)_{1,6}$

D'après ces courbes continues, relevons pour ces valeurs d'abscisses x_1 , comme nous l'avons déjà fait pour la courbe S_1 , les valeurs des ordonnées n_1 et portons-les dans le tableau E.

Enoncé 23 : Les courbes d'écoulement N des ouvertures de 60 mm. et plus, sous des charges relatives inférieures à 3,3 se trouvent du côté intérieur des courbes d'écoulement S . Leurs

ordonnées n sont d'autant plus petites que la charge h_1 est plus faible. Pour $h_1 = 1$ la courbe d'écoulement $(N)_1$ est une droite qui se confond avec l'axe des x .

Enoncé 24 : D'après une courbe expérimentale N pour une valeur déterminée h_1 on peut déduire par similitude géométrique, suivant la hauteur a de l'ouverture, la courbe N pour une autre ouverture quelconque plus grande que 60 mm.; toutefois, la valeur h_1 doit rester alors constante.

26 — Courbes d'écoulement M , c'est-à-dire pour petites ouvertures et grandes charges

Les courbes M ont été établies aux essais 16 et 18. Les coordonnées mesurées x et m sont indiquées dans le tableau B. Les courbes M ne sont pas extrapolables; pour cette raison, les paramètres d'ordonnées correspondant à leurs coordonnées ne figurent pas dans le tableau D ni dans le tableau E. Malgré cela, afin de faire ressortir leur nature, on en a extrapolé d'après les chiffres dans le tableau B pour $a = 1$ m. et on les a portés sur la fig. 12 comme courbes $(M_1)_{0,02}$ et $(M_1)_{0,04}$; elles se trouvent du côté intérieur de la courbe S_1 comme cela ressort déjà des inégalités 66 d'après lesquelles on a $\alpha_E > \alpha_S$. Les deux courbes M_1 de la fig. 12 n'ont pas de validité réelle.

Enoncé 25 : Les courbes d'écoulement M pour des petites ouvertures et des grandes charges ne sont valables que pour des hauteurs d'ouverture inférieures à $a = 60$ mm.

Enoncé 26 : Lorsqu'il s'agit d'un essai à échelle réduite dans lequel on cherche la courbe S ou N , l'échelle de réduction ne doit pas être inférieure à la limite de laquelle résulte une hauteur de l'ouverture d'écoulement de 60 mm.

27 — Comparaison de la courbe S pour les grandes ouvertures et les grandes charges avec la courbe d'écoulement théorique « T »

Traçons d'après les paramètres x_1 et t_1 tirés du tableau A la courbe T_1 en grandeur réelle. Relevons avec précision sur ce graphique les ordonnées t_1 et cela pour les mêmes abscisses x_1 que nous avons choisies pour les ordonnées s_1 et n_1 ; portons les chiffres obtenus dans le tableau E.

Comparons les courbes S_1 et T_1 de la fig. 12. La courbe S_1 passe partout du côté intérieur de la courbe T_1 . Calculons d'après les indications du tableau E de combien de pour cent les ordonnées t_1 sont plus grandes que les ordonnées s_1 , par conséquent les nombres

$100 \frac{t_i - s_i}{s_i} \%$. Les résultats sont donnés numériquement à la dernière ligne du tableau É et graphiquement par la courbe au-dessus de l'axe des x sur la fig. 12. Dans sa majeure partie cette courbe indique que l'ordonnée t_i est de 6 % plus grande que l'ordonnée s_i correspondant à la même abscisse. Toutefois, vers l'origine, le pourcentage augmente jusqu'à ce que pour le paramètre d'abscisse 0,01 ce pourcentage atteigne 14,7.

La différence entre les grandeurs des ordonnées s_i et t_i croît par suite de l'accroissement de la différence de courbure à l'origine des courbes S_i et T_i .

Calculons ensuite le coefficient angulaire et le rayon de courbure de la courbe S_i au point O_2 . Dans ce but, remplaçons la partie de la courbe S_i à l'arête de la vanne, par une parabole du deuxième degré et dont nous calculerons l'équation d'après plusieurs points mesurés le plus près possible de l'origine O_2 des axes de coordonnées (fig. 17).

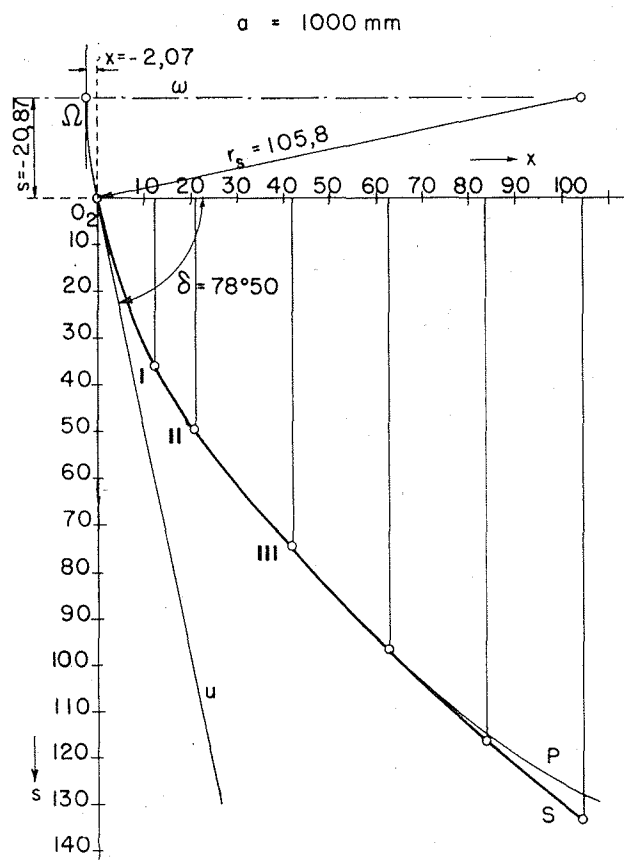


Fig. 17

Parabole de substitution du commencement de la courbe d'écoulement.

Avec les axes de coordonnées x, s , de la fig. 17, l'équation d'une parabole, dont l'axe est parallèle à l'axe des x , est

$$x = ks + ls^2 \quad (71)$$

Soient x_i et s_i les coordonnées mesurées arbitrairement de la courbe S ; alors nous écrivons conformément à la règle de calcul des moindres carrés

$$\frac{\delta \sum (x - x_i)^2}{\delta k} = 0 \quad (72)$$

$$\frac{\delta \sum (x - x_i)^2}{\delta l} = 0 \quad (73)$$

Calculons la deuxième puissance dans l'équation 72, introduisons la valeur x tirée de l'équation 71 et effectuons la dérivation partielle; nous trouvons :

$$k \sum_1^n s_i^2 + l \sum_1^n s_i^3 = \sum_1^n s_i x_i \quad (74)$$

Faisons de même avec l'équation 73 et nous obtenons :

$$k \sum_1^n s_i^3 + l \sum_1^n s_i^4 = \sum_1^n s_i^2 x_i \quad (75)$$

On tire de l'équation 75 :

$$l = \frac{\sum_1^n s_i^2 x_i - k \sum_1^n s_i^3}{\sum_1^n s_i^4} \quad (76)$$

Introduisons l'équation 76 dans 74 et déduisons-en :

$$k = \frac{\sum_1^n s_i x_i \sum_1^n s_i^4 - \sum_1^n s_i^2 x_i \sum_1^n s_i^3}{\sum_1^n s_i^2 \sum_1^n s_i^4 - (\sum_1^n s_i^3)^2} \quad (77)$$

Pour calculer les valeurs k et l utilisons les points I (12,5-35) II (20,8-48) III (41,6-75) d'après le tableau D, ligne 6, qui ont été mesurés dans des conditions d'écoulement particulièrement favorables.

Celles-ci donnent l'équation recherchée de la parabole

$$x = 0,1986 s + 0,004759s^2 \quad (78)$$

Calculons l'inclinaison de la tangente à la parabole par rapport à l'axe $+x$

$$\frac{dx}{ds} = x' = 0,1986 + 2 \cdot 0,004759s = \text{ctg } \delta \quad (79)$$

Pour l'inclinaison δ de la tangente au point

O₂ on a $s = 0$; par conséquent d'après l'équation 79

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg} \delta &= 0,1986 \\ \delta &= 78^{\circ}50' \end{aligned} \quad (80)$$

Pour l'ordonnée du sommet de la parabole on a $\operatorname{ctg} \delta = 0$, c'est-à-dire :

$$\begin{aligned} 0,1986 + 0,009518 s &= 0 \\ s &= -20,87 \text{ mm.} \end{aligned} \quad (81)$$

Introduisons la valeur de s de l'équation 81 dans l'équation 78 ; alors l'abscisse du sommet de la parabole est :

$$x = -2,07 \text{ mm.} \quad (82)$$

Le rayon de courbure d'une parabole du deuxième degré est donné par la formule

$$r_s = \frac{(1 + x'^2)^{3/2}}{x''} \quad (83)$$

Calculons d'après l'équation 79 :

$$x'' = \frac{dx'}{ds} = 0,009518 \quad (84)$$

Introduisons les valeurs x' et x'' des équations 79 et 84 dans l'équation 83 ; il en résulte :

$$r_s = 105,8 \text{ mm.} \quad (85)$$

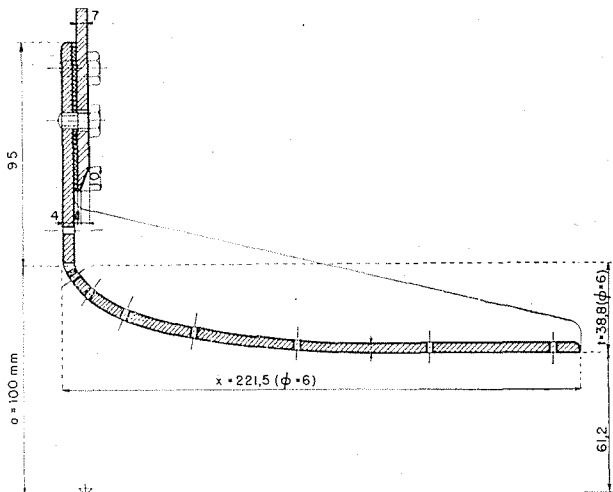


Fig. 18

Surface inférieure de la vanne suivant la courbe théorique.

Les coordonnées calculées de la parabole sont en mm.

x :	0	5,88	15,56	46,35	67,45	92,36
s :	0	20	40	60	100	120

A l'aide des équations 78 à 85 nous avons déterminé, d'après les points mesurés, la trajectoire d'un filet liquide réel autour de l'arête de la vanne, sa déviation au delà de l'arête du plan de la vanne, le rayon de courbure réel autour de l'arête et l'inclinaison de la tangente de la courbe d'écoulement à l'arête. Toutes ces

valeurs calculées sont valables pour l'ouverture $a = 1$ m. Pour une autre grandeur a , on calcule les grandeurs du rayon de courbure et des coordonnées au sommet de la parabole exprimées en mm., en multipliant les valeurs données par les équations 81, 82 et 85 par la valeur a donnée en mètres.

Le rayon de courbure à l'arête est petit. Koch a trouvé théoriquement pour sa grandeur 143 mm., tandis que nous avons trouvé 105,8 mm.

La tangente à l'arête ne s'écarte que de 11° de la verticale, son inclinaison n'a pas été déterminée par Koch.

Enoncé 27 : La courbe d'écoulement théorique T constitue la limite extérieure des courbes d'écoulement réelles S et de ce fait, aussi de toutes les dernières courbes d'écoulement pour l'ouverture constante a de la vanne. Toutefois, la courbure de son commencement ne correspond pas exactement à la courbure de la courbe d'écoulement réelle S .

Enoncé 28 : La déviation d'un filet liquide réel du plan vertical de la vanne en amont est insignifiante. Aux essais avec faible hauteur a elle n'est pas observable à l'œil ; mais elle se manifeste par une diminution de la pression sur la partie correspondante de la surface de la vanne.

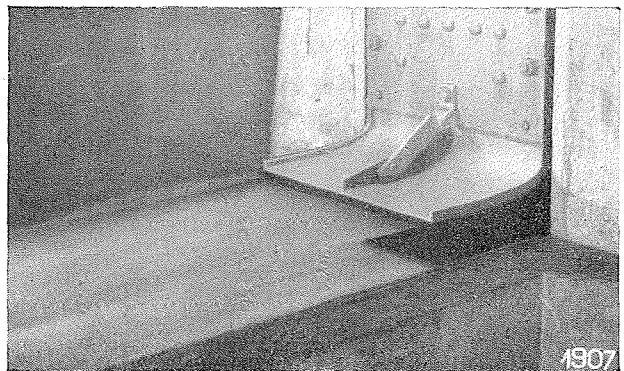


Fig. 19

Écoulement au-dessous de la surface de la vanne formée suivant la courbe théorique.

28 — Essai avec une surface ayant comme profil la courbe d'écoulement théorique

Si nous donnons à la surface matérielle réelle un profil suivant la courbe T , nous pouvons nous attendre à ce que le jet sortant de dessous la vanne exerce sur elle une pression et ne décollera pas de cette surface ; sans doute pas même à son origine, puisque des rayons de courbure plus faibles dans cette partie compensent une

plus grande inclinaison des tangentes, c'est-à-dire une pente plus raide de la courbe T . Assurons-nous en, au moyen de cet essai :

Essai 21

Fixons par des vis sur la vanne, fig. 18, une surface modelée aussi exactement que possible suivant les coordonnées de la courbe théorique $T_{0,1}$, c'est-à-dire pour $a = 100$ mm. L'arête terminale de la surface est déterminée pour $\varphi = 6$ par l'abscisse $x = 0,22146$ m. = 221 mm. et l'ordonnée $s = 0,0388$ m. = 38,8 mm. (voir tableau A).

Faisons un essai pour $a = 100$ mm. et $h = 660$ mm., c'est-à-dire pour $h_1 = 6,6$ - fig. 19.

Les pressions qui seront exercées par le courant sortant de dessous la vanne sur cette surface, seront mesurées en m. de colonne d'eau $t_{0,1} - s_{0,1}$. Par exemple : pour $x_{0,1} = 0,05$ m. nous avons d'après le tableau E : $t_{0,1} - s_{0,1} = 0,03091$ m. — $0,02910 = 1,8$ mm.

Comme la tôle en laiton formant la surface, a une épaisseur de 4 mm., l'eau va pénétrer dans un trou percé, mais n'en émergera pas. Cette circonstance se confirme dans chacun des nombreux trous. Une vue latérale de la surface inférieure de la tôle, fig. 20, montre que le jet sortant ne décolle jamais. Aussi de l'eau versée sur le trou à la surface supérieure de la tôle n'est pas aspirée par le courant. Par conséquent, **la surface est partout sous pression ; nulle part, il n'y a de dépression.**



Fig. 20

Aspect de l'écoulement au-dessous de la surface de la vanne formée suivant la courbe théorique.

Enoncé 29 : La surface d'appui de la vanne ayant un profil suivant la courbe T relative

aux plus grandes ouvertures de la vanne n'est pas accompagnée d'aspiration.

Faisons encore :

l'essai 22

Abaissons la charge relative à $h_1 = 1,6$. Pour $x_{0,1} = 0,05$ m. on a, d'après le tableau E, $t_{0,1} - (n_{0,1})_{1,6} = 0,03091$ m. — $0,02480$ m. = 6,1 mm. $0,02480$ m. = 6,1 mm.

L'essai montre que l'eau sort par les trous à la surface supérieure de la tôle, c'est-à-dire **la pression sur la surface a augmenté.**

IV. — APPLICATION

29 — Quels résultats obtient-on avec une poutre d'appui pour vanne dont une partie du contour est, soit le quart d'une ellipse, soit le commencement de la courbe d'écoulement.

Supposons qu'à l'ouverture de la vanne depuis $a = 0$ jusqu'à $a_2 = a$ max. = 2 m., la charge relative h_1 ne descend pas au-dessous de 3,3. Traçons sur la fig. 21 les courbes $T_{0,2}$ pour l'ouverture $a = 0,2$ m., $T_{0,4}$, $T_{0,6}$, $T_{0,8}$, T_1 et T_2 .

Choisissons une largeur totale de la poutre d'appui de 0,30 m. et un contour formant le quart d'une ellipse. Soit 0,10 m. la longueur de la tangente horizontale qui est le tracé de la surface d'appui proprement dite de la poutre en chêne. Alors le demi grand axe de l'ellipse a 0,20 m., le demi petit axe pour le rapport 5 : 3, a 0,12 m. La hauteur totale de la poutre est de 0,27 m.

Conformément à la fig. 21, nous pouvons faire les énoncés suivants :

Enoncé 30 : Sur la partie plane horizontale de la poutre d'appui, il y a une dépression même pour une faible élévation de la vanne.

Enoncé 31 : Plus est grande l'ouverture de la vanne, plus est grande la partie de la surface elliptique de la poutre d'appui sur laquelle se produit une dépression lors de l'écoulement de l'eau.

Enoncé 32 : Entre le profil elliptique de la partie d'appui et la surface du jet sortant de dessous la vanne, il se forme des espaces dont la hauteur diminue vers l'amont ; il s'y établit une

dépression qui est d'autant plus grande que leur hauteur est plus petite.

Nous arrivons aussi à des conclusions analogues pour la poutre d'appui dont une partie du profil est formée par un quart de cercle.

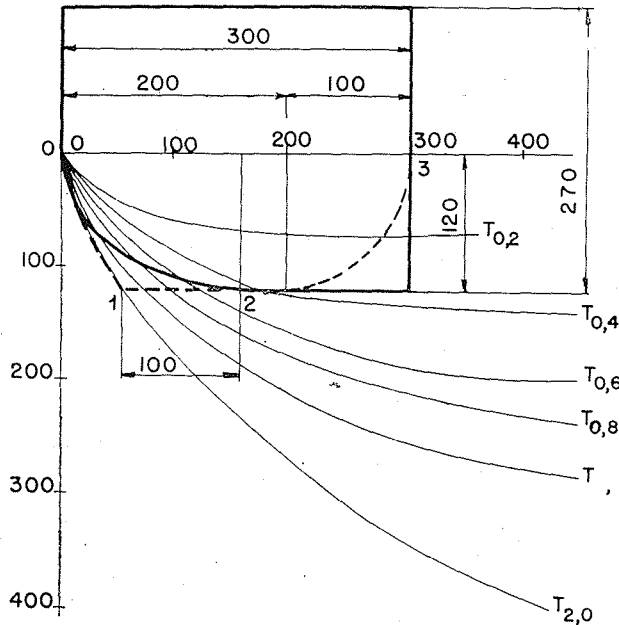


Fig. 21

Poutre d'appui ayant comme profil le quart d'une ellipse ou la courbe d'écoulement.

Formons le profil de la poutre d'appui par la courbe tracée sur la fig. 21 en trait discontinu, c'est-à-dire par une partie de la courbe $T_{2,0}$, par un segment de droite parallèle à l'axe des abscisses $\overline{T2}$ ayant une longueur de 0,10 m. et par un quart d'ellipse ayant comme axes 0,12 m. et 0,145 m.

Dans le cas où à l'ouverture $a < 2$ m., la surface $\overline{01}$ est soumise à la poussée, elle subit à l'ouverture maximum $a = 2$ m. la pression $P_1 - P_0 = 0$. La surface d'appui proprement dite $\overline{T2}$ est en dépression aux petites ouvertures de la vanne ; aux grandes ouvertures, l'espace entre cette surface et le jet sortant s'élargit considérablement, ce qui favorise dans le cas de l'écoulement à surface libre, l'arrivée de l'air sous la surface en question.

La surface courbe $\overline{23}$ favorise encore l'arrivée de l'air au courant.

Enoncé 33 : La forme de la poutre d'appui tracée suivant la courbe d'écoulement est plus avantageuse que la forme recommandée jusqu'ici et qui est celle d'un quart d'ellipse. La

dépression maximum qui agit sur la surface ayant cette forme, se produit sur la surface plane d'appui proprement dite.

Dans ce qui suit, nous verrons plusieurs exemples pratiques qui montreront la possibilité d'application et les avantages ultérieurs de l'idée étudiée.

30 — La forme de la surface d'appui de la vanne plate constituant la porte inférieure de l'écluse pour le passage du bois flotté sur la Vah à Ladce.

L'écluse sur la rivière Vah à Ladce se trouve près de la centrale hydroélectrique. A l'aval, fig. 22, elle est formée par une porte levante. Le sas est rempli jusqu'à la cote 258,90 de l'eau amont, et il se vide pour le passage du radeau jusqu'à la cote 244,0 de l'eau aval. Cette vidange se fait en 2 à 3 minutes par l'ouverture au-dessous de

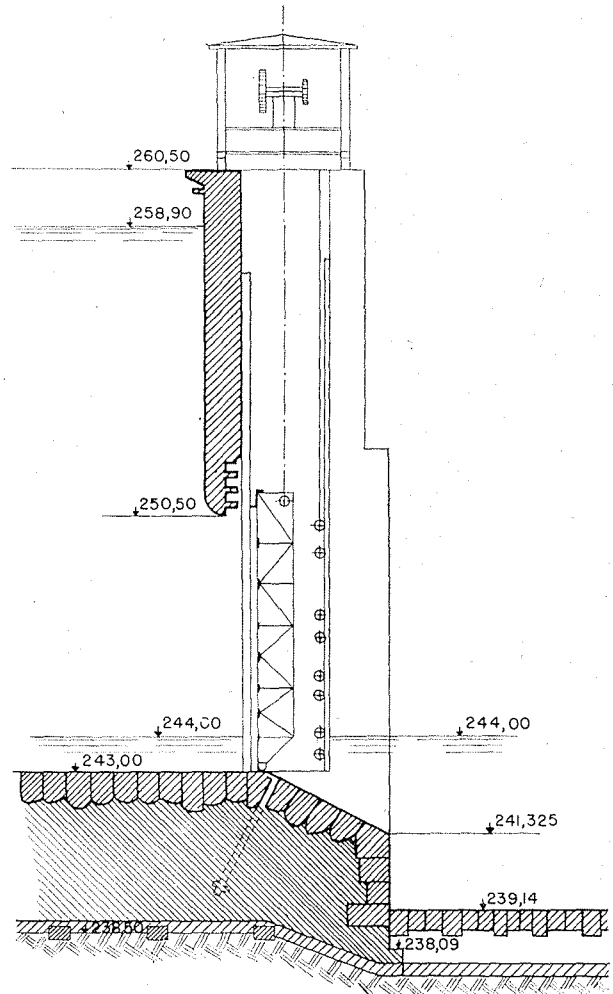


Fig. 22

Vidange aval de l'écluse pour le passage du bois flotté sur la rivière Vah, à Ladce.

la porte créée par le levage de cette porte. Le sas a 30 m. de longueur et 7 m. de largeur. La porte pèse 50 tonnes et le contrepoids de la porte 35 tonnes.

Calculons l'élévation maximum utile a_{\max} de la porte afin que le sas se vide en 2 minutes. Comme le sas a des parois verticales, nous allons employer la formule suivante :

$$a_{\max} = \frac{2 b h l}{\mu b \sqrt{2gh} \tau} \quad (86)$$

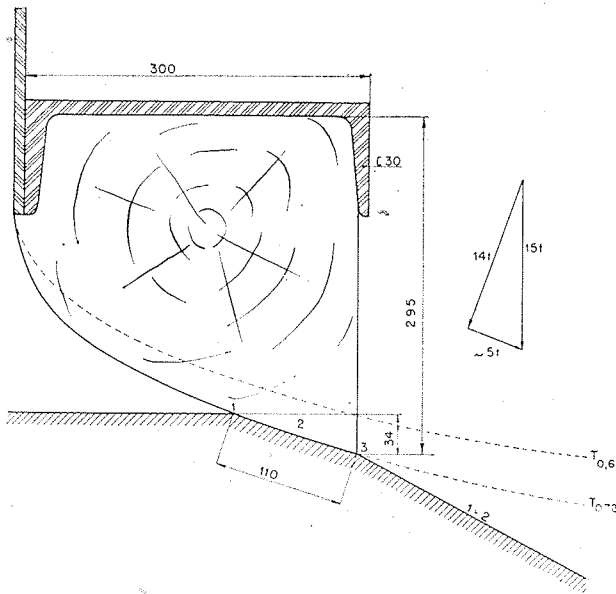


Fig. 23

Projet de la poutre d'appui de la porte aval de l'écluse pour le passage du bois flotté à Ladce.

On a, dans la formule 86 :

- b = largeur du sas = 7 m.
- h = différence de hauteur des niveaux d'eau amont et aval = 14,9 m.
- l = longueur du sas = 30 m.
- μ = coefficient de débit dont nous avons évalué la valeur d'avance = 0,75.
- τ = durée de la vidange du sas = 120 sec.

Après avoir introduit ces valeurs dans la formule 86, on a :

$$a_{\max} = 0,582 \text{ m.} = 0,60 \text{ m.}$$

Traçons sur la fig. 23, d'après les paramètres du tableau E multipliés par 0,6, la courbe $T_{0,2}$. Mais pour plus de sécurité, donnons au profil de la surface d'appui, la forme de la courbe $T_{0,6}$ dont les coordonnées sont de 20% plus grandes que celles de la courbe $T_{0,6}$.

Fixons la poutre d'appui à un fer U de 30. Donnons à la surface d'appui une largeur de 11 cm. Alors l'extrémité de la surface d'appui à l'aval est, par rapport au seuil horizontal, de 3,40 cm. plus bas.

Le seuil fixe doit avoir la forme qui est indiquée sur la fig. 23. Le travail de taille pour former la rainure peu profonde pour la poutre d'appui de 7 m. de longueur et 0 m. 11 de largeur est simple et peu coûteux.

L'augmentation, pour raison de sécurité, des ordonnées de 20% est aussi recommandée par le fait que le seuil fixe n'est plus horizontal depuis le point 1.

Au-dessus de la surface creuse du seuil fixe, il se produira une dépression parce que les filets d'eau ne peuvent pas suivre la courbe 123.

Lorsque le jet s'écoule au-dessous de la surface d'eau aval, j'ai expliqué ailleurs (7, 8) qu'il est souvent nécessaire de former la crête du barrage de manière qu'après la vanne entre le jet sortant de dessous la vanne et la crête du barrage, il se produise une dépression qui oblige le jet de se diriger vers le fond du seuil du barrage.

Donnons, dans ce cas, au parement aval, une pente 1 : 2.

Lorsque la vanne est abaissée, la différence entre le poids de la vanne et celui du contrepoids, soit 50 t. — 35 t. = 15 t., exerce une pression sur la crête dans la direction verticale. Comme on le voit d'après le triangle des forces sur la fig. 23, la composante perpendiculaire à la surface d'appui est de 14 tonnes et la composante tangentielle d'environ 5 tonnes. Cette composante tangentielle de 5 t. est contre-balançée par le frottement du bois de chêne sur la pierre assez rugueuse. Pour équilibrer les forces mentionnées, il aurait fallu un coefficient de frottement au glissement $f = 5 : 14 = 0,36$ que l'on peut supposer avec sécurité.

C'est de cette manière que serait exécutée la poutre d'appui des portes à Ladce sans dépression, ce qui est d'autant plus important qu'avec les portes soulevées, le sas servirait comme trop-plein de secours pour l'écoulement continu de l'eau dans le cas où les turbines sont en réparation. Le degré suivant de l'exploitation de l'énergie hydraulique de la Vah à Hava nécessitera le même arrangement ; l'écoulement continu au-dessous de la vanne peut durer aussi plus d'une semaine. La forme proposée du seuil d'appui permettrait d'éliminer les effets dynamiques et de cavitation qui auraient été d'autant plus importants que la durée d'écoulement au-dessous de la vanne serait longue.

Enoncé 34 : Il est possible de former toute la surface d'appui de la vanne sans dépression, suivant la courbe d'écoulement théorique dans le cas où il est possible d'adapter la forme de la crête fixe du barrage à celle de la poutre d'appui.

Le coefficient de contraction du jet d'eau sortant de dessous la surface d'appui de la vanne peut être calculé approximativement suivant la formule 60, écrite sous la forme suivante :

$$\alpha_p = 0,61 \frac{1}{1 - 0,72 t_1} \quad (87)$$

Nous trouverons la valeur de t_1 sur le tableau E; pour $x_1 = 0,30$ m. nous lisons $t_1 = 0,2522$; alors :

$$\alpha_p = 0,748$$

Le coefficient de contraction pour l'eau est légèrement plus grand que sa valeur pour un liquide non visqueux que nous avons justement calculée. Par contre, le coefficient d'écoulement a des valeurs d'environ 3 % inférieures à celle du coefficient de contraction. Pour cette raison, la valeur estimée plus haut $\mu = 0,75$ est très acceptable et offre d'autant plus de sécurité, que la dépression au-dessous du jet contribue à l'accroissement du coefficient d'écoulement.

31 — Quatre formes de la poutre d'appui pour les vannes Stoney du barrage de la Vltava à Stechovice

Sur le barrage de la Vltava à Stechovice, dont la crête sera à la cote 214,65 m., il y aura des

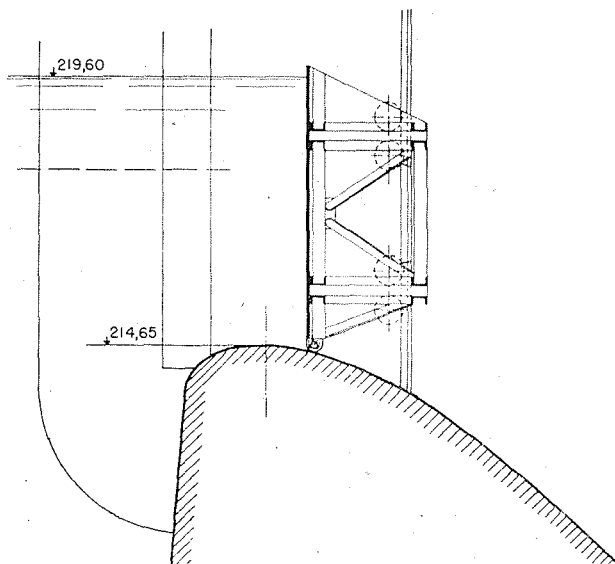


Fig. 24

Crête du barrage à Stechovice avec la vanne

vannes verticales sur toute la crête rehaussant le niveau amont jusqu'à la cote 219,60, fig. 24. La distance horizontale libre entre les piles de chacun des 5 pertuis est 20 m. Près de ce haut barrage, il y aura une centrale hydraulique dont les turbines absorbent tous débits jusqu'à 150 m³/sec. Les débits supérieurs à 150 m³/sec. seront évacués au-dessous des vannes avec une hauteur constante du niveau amont à la cote 219,60 et cela jusqu'au débit maximum. Le débit maximum de la plus grande crue de l'année 1890 a été pour la Vltava à Stechovice 2400 m³/sec. et il lui correspond justement la hauteur du déversement 219,60 — 214,65 = 4,95 = 5 m.

Pour cette raison, il faut prendre en considération que les vannes seront ouvertes depuis $a = 0$ m. jusqu'à $a = 5$ m. avec une charge de 5 m. à 0 m.

Les courbes d'écoulement seront alors les courbes S et N.

a) Forme de la poutre d'appui suivant la fig. 25.

Choisissons par tâtonnement la courbe T,

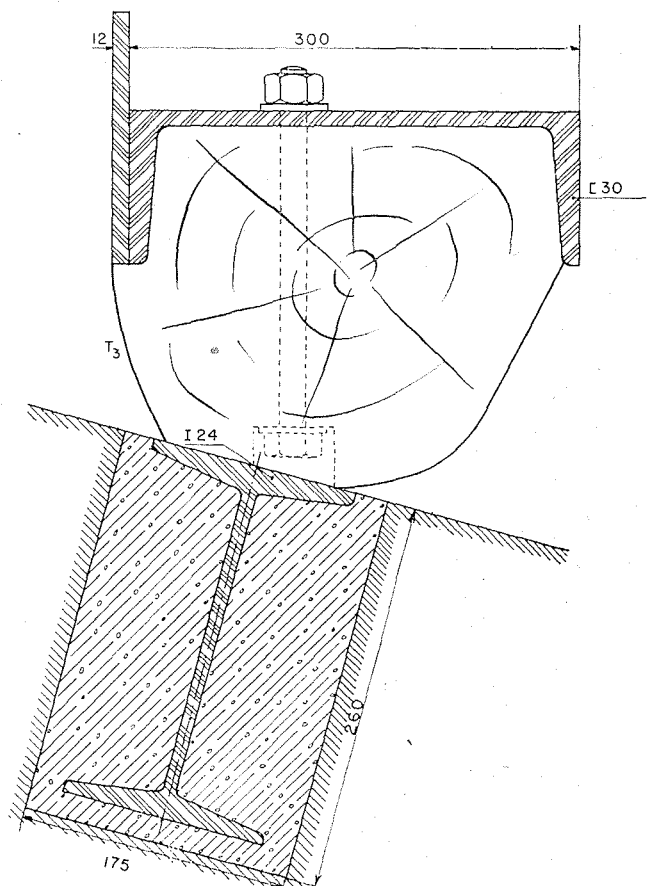


Fig. 25

Projet a) de la poutre d'appui de la vanne pour le barrage à Stechovice.

c'est-à-dire pour l'ouverture $a = 3$ m., comme courbe suivant laquelle nous désirons tracer le profil de la poutre d'appui.

Pour l'abscisse $x = 0,30$ m. on a, d'après le tableau E les ordonnées

$$t_3 = 3 \times 0,2522 = 0,76 \text{ m.}$$

$$s_3 = 3 \times 0,2375 = 0,71 \text{ m.}$$

Pour l'ouverture $a = \frac{5 \text{ m.}}{1,6} = 3,12$, on a,

d'après le tableau E :

$$(n_{3,12})_{1,6} = 3,12 \times 0,1953 = 0,61 \text{ m.}$$

Pour l'ouverture $a = \frac{5 \text{ m.}}{1,4} = 3,57$ m., on a

$$(n_{3,37})_{1,4} = 3,57 \times 0,1664 = 0,594 \text{ m.}$$

En comparant les valeurs des quatre ordonnées en question, nous voyons que, si nous choisissons le profil de la poutre d'appui suivant la courbe T_3 , le jet sortant de dessous la vanne exercera une pression sur toute la surface dans toutes les positions de la vanne.

Comme l'écoulement de l'eau au-dessous d'une vanne du barrage à Stechovice n'arrivera pas sur une surface horizontale, mais sur une surface gauche inclinée vers le bas, il y a lieu de prendre en considération l'effet de la force de la pesanteur. Mais comme la surface gauche de la crête ne s'écarte que peu de l'horizontale sur une largeur relativement petite de la surface d'appui de la vanne, on peut négliger l'effet de la pesanteur et cela d'autant plus que l'effet en question est plus que suffisamment contre-balançé par la marge de sécurité avec laquelle nous avons choisi la courbe T_3 . Toutefois, il faut compter l'ordonnée $y = a - t$ de la courbe d'écoulement T non à partir de l'horizontale, mais de la courbe représentant le profil de la crête déversante. Toute la forme de la poutre d'appui est tracée sur la fig. 25.

A Stechovice, la vanne Stoney s'appuie sur une traverse encastrée dans la maçonnerie du barrage; en hiver, la traverse sera chauffée électriquement, afin de faire fondre la glace qui s'est formée éventuellement.

b) Forme de la poutre d'appui suivant la fig. 26.

La vanne Stoney s'infléchit sous l'effet de la pression hydrostatique comme support chargée horizontalement.

Sur les vannes de largeur constante 20 m. et de hauteur constante 5 m., cette flèche est de 35 mm. Si nous recourbons la structure non chargée de la moitié de cette flèche à l'amont, la flèche reste encore de 18 mm. Celle-ci, si la

surface d'appui a l'obliquité comme sur la figure 25, ouvre une fente entre cette surface et la crête du barrage ayant jusqu'à 5 mm. au milieu et donne lieu à une fuite. Pour cette raison, il est indiqué d'employer pour le barrage à Stechovice un seuil muni d'une bande de caoutchouc suivant la fig. 26 qui est en saillie par rapport au plan

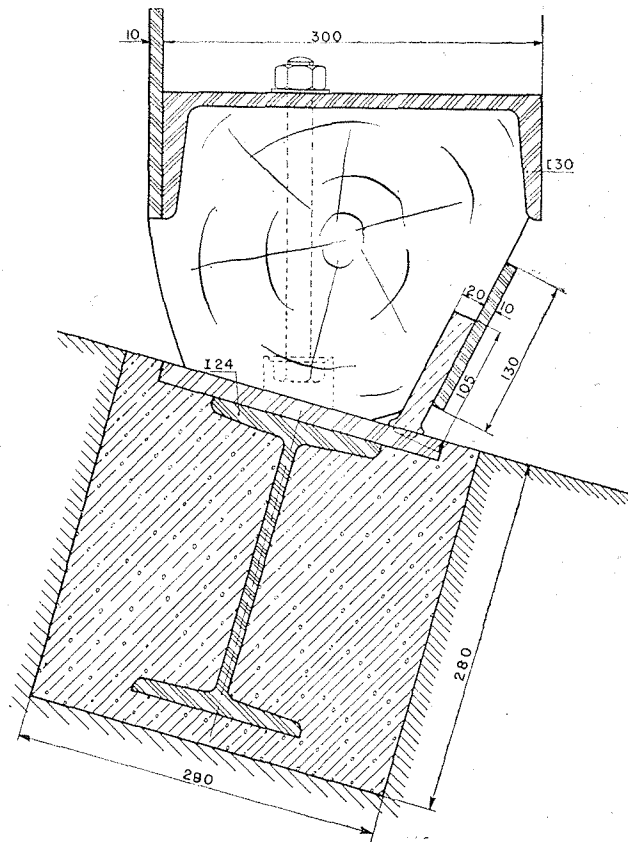


Fig. 26

Projet b) de la poutre d'appui de la vanne pour le barrage à Stechovice.

de la surface d'appui aux piles de 5 mm. et au milieu, de 10 mm. Lorsque la poutre appuie sur le seuil, le caoutchouc va se déformer et assurera bien l'étanchéité. Dans le cas d'une déformation anormale de la poutre en chêne sous l'effet de l'eau et du soleil, cette bande de caoutchouc est ajustée par des coins, de manière à assurer l'étanchéité.

Avec les formes du seuil de la vanne suivant les fig. 25 et 26, il se produit une dépression sur la surface plane d'appui proprement dite aux ouvertures tout à fait petites, mais qu'on ne doit pas prendre en considération, si on n'utilise, pour le passage d'un faible excédent de débit, que la vanne du milieu au lieu de toutes les cinq. Aux grandes ouvertures des vannes, l'air pourra facilement pénétrer dans l'espace au-dessous de la

poutre d'appui, étant donné que l'écoulement se fait à surface libre et que le jet sortant de dessous les vannes suit la crête du barrage vers le bas.

c) Forme de la poutre d'appui suivant la fig. 27

On donne sur la fig. 27 les formes de la poutre d'appui pour le barrage de Stechovice qui aurait été sous dépression jusqu'à l'ouverture de la vanne $a = 1$ m. Elle est tracée d'après la courbe T_1 et disposée juste au-dessus du centre de gravité de la vanne Stoney, c'est-à-dire à 0,66 m. à l'aval de la tôle de bordé de la vanne.

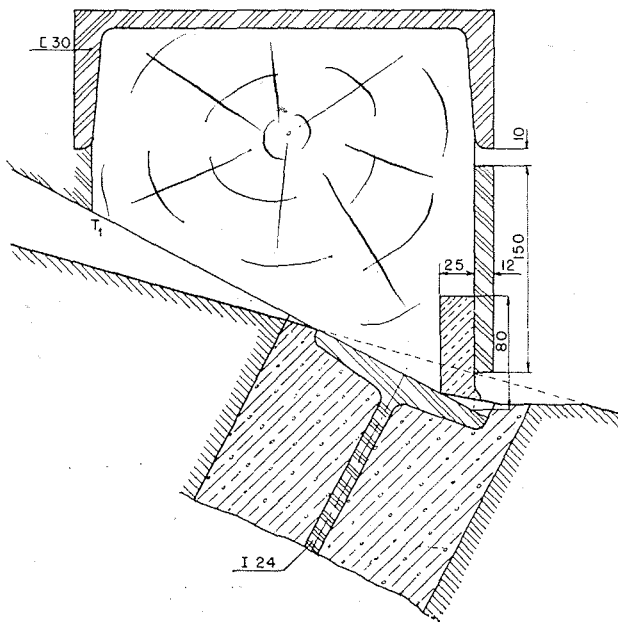


Fig. 27

Projet c) de la poutre d'appui de la vanne pour le barrage à Stechovice.

L'ouverture seulement, jusqu'à un mètre, et l'emplacement de la poutre plus loin à l'aval, ont été choisis afin que la courbe d'écoulement soit moins raide. Malgré cela, le maintien précis de la courbe exige une légère déformation du seuil fixe. La déformation du seuil fixe ne serait pas nécessaire s'il était possible de disposer la vanne de manière que le plan tangent à l'extrémité de la poutre d'appui formé suivant la courbe T_1 s'écarte de manière constante de l'horizontale comme le plan tangent du seuil fixe à l'endroit d'appui de la vanne.

Pour éviter la dépression, toute la surface inférieure de la vanne depuis la tôle de bordé jusqu'à la poutre d'appui, aurait dû être formée suivant la courbe T_1 . Bien que cela soit tout

à fait réalisable au point de vue constructif, en formant la tôle suivant un gabarit, néanmoins cette variante n'est pas à recommander, non seulement à cause de l'accroissement du prix de revient, mais aussi en raison des pulsations inévitables du jet sortant de dessous la vanne, qui se manifestent d'autant plus que la surface de contact de la vanne avec le jet est plus large.

d) Surface d'appui étroite de la vanne suivant fig. 28.

Il a déjà été indiqué au commencement que la surface d'appui d'une vanne la plus parfaite aurait été une arête biseautée qui ne permettrait pas, même aux plus petites ouvertures de la vanne, la formation d'une dépression. La fig. 20 montre un tel appui de la vanne. A la crête du barrage sur une lame de fer et entre des cornières évasées en fer, on a inséré un prisme en caoutchouc dur qui affleure exactement la surface déversante de la crête. Sur ce support élastique, s'appuie la vanne moyennant sa tôle de bordé élargie par une lame en fer de 20 mm. d'épaisseur.

Pour le barrage à Stechovice, une vanne plate pèsera 45 t. Supposons que la pression spécifique sur le prisme en caoutchouc est de 5 kg/cm^2 . Alors, avec la longueur de la vanne de 20 m., la largeur nécessaire d'appui est de 45 mm. La tôle de bordé de la vanne ne s'étend pas sur toute cette largeur de 45 mm. Le seuil à Stechovice est incliné et, par conséquent, pour assurer l'étanchéité parfaite, il faut employer encore une bande de caoutchouc d'environ 15 mm. d'épaisseur rattachée à la tôle de bordé.

Je présume que cette bande en caoutchouc, lorsqu'elle adhère au prisme en caoutchouc, supporte aussi le poids de la vanne moyennant la pression spécifique d'environ 5 Kg/cm^2 , alors toute la largeur de la surface d'appui est 45 mm. comme le montre la fig. 28.

La bande de caoutchouc peut être dégagée de son serrage entre deux lames en fer par deux rangées de boulons horizontaux et être appuyée vers le bas au moyen de boulons verticaux qui agissent sur la bande par l'intermédiaire d'une bande en fer de 10 mm. d'épaisseur.

A la place du prisme en caoutchouc, on pourrait employer aussi d'autres matières qui seraient élastiques, indéformables et résistantes à l'eau. Mais la fabrication du caoutchouc a atteint une telle perfection qu'il est possible de fabriquer des caoutchoucs de différentes duretés et de grandes résistances, contre les effets de l'eau. Par exemple, la firme Bata qui a fourni des bandes en caoutchouc pour assurer l'étanchéité de joints entre les plaques en béton qui stabilise

le fond et les talus du canal d'aménée vers la centrale de Ladce sur la Vah, a donné pour ces bades une garantie de 12 ans.

L'échange d'un prisme en caoutchouc usé pourrait s'effectuer en brisant le béton à droite de la cornière en fer à l'aval, et en dégageant celle-ci qui n'est rattachée au support que par des boulons.

Enoncé 35 : Sur les barrages déversants il est rationnel d'employer une bande de caoutchouc fixée à la poutre d'appui en chêne ; il est possible d'empêcher, grâce à cette bande, les faits qui se produisent lorsque la vanne fléchit ; si la surface du seuil fixe est inclinée vers l'aval, il est également possible moyennant cette bande, d'assurer commodément l'étanchéité dans le cas de la déformation de la poutre d'appui en bois.

Enoncé 36 : Etant donnée la perfection technologique actuelle du caoutchouc, il est possible

d'affirmer qu'on peut l'utiliser comme support élastique encastré dans le seuil fixe et sur lequel s'appuie la vanne, moyennant une surface dure et étroite ; la faible largeur de cette surface offre des avantages de l'écoulement au-dessous d'une arête biseautée de la vanne.

32 — La surface d'appui de la vanne de l'aqueduc de l'écluse pour bateaux à Stechovice.

L'aqueduc de l'écluse pour bateaux à Stechovice a une section transversale représentée par la fig. 29. Elle se compose d'une moitié de carré de 2 m. de côté, surmontée d'un demi-cercle de 1 m. de rayon.

Ainsi, la hauteur intérieure de l'aqueduc dans l'axe est de 2 m. Le fond de l'aqueduc s'abaisse dans le plan vertical à partir de l'ouverture d'entrée vers l'aval suivant une courbe en S depuis la cote 207,00 à la cote 196,65 et ensuite est horizontal.

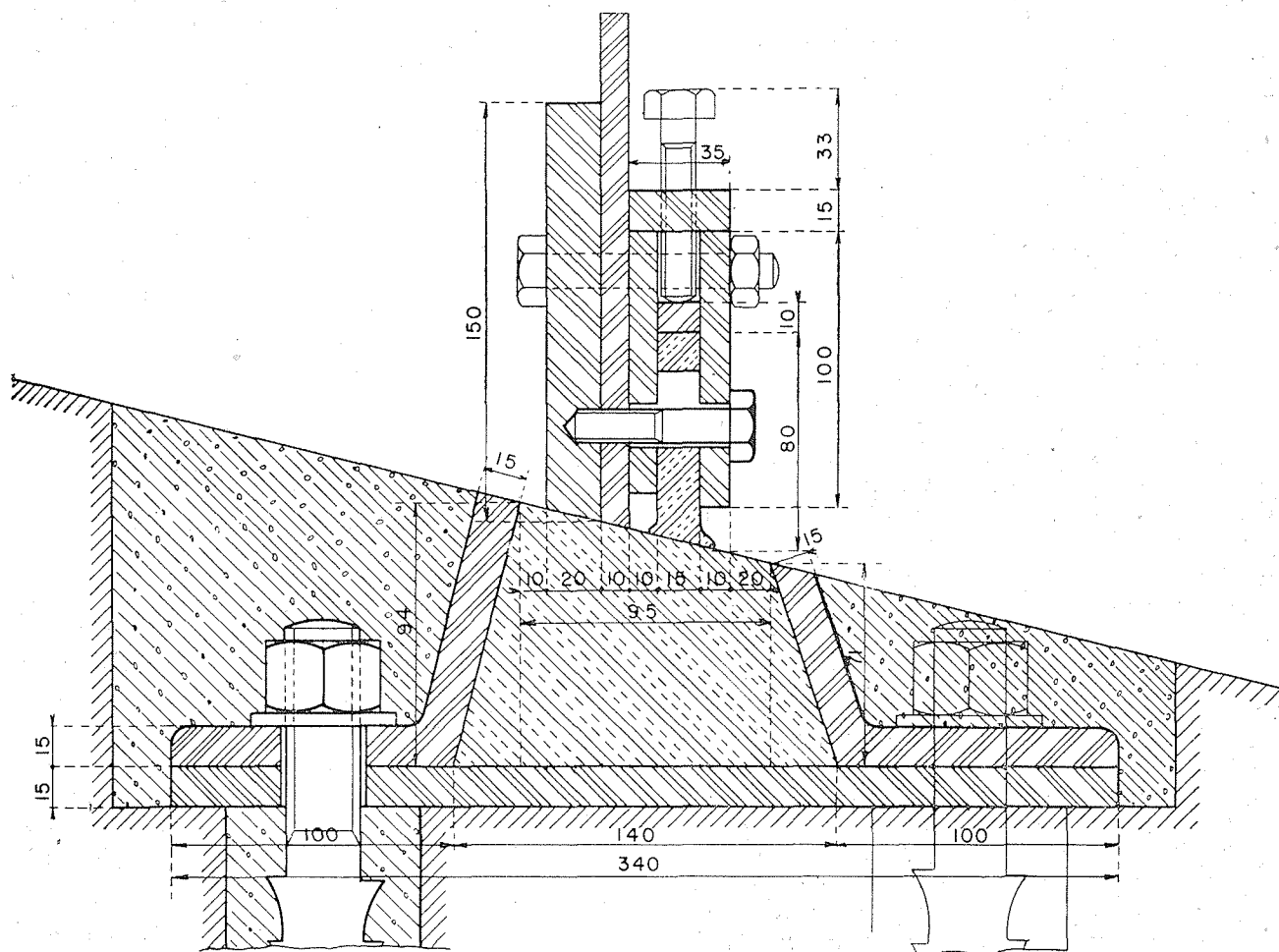


Fig. 28

Projet d) de la poutre d'appui de la vanne pour le barrage à Stechovice.

La vanne en forme d'écran vertical, obturant l'aqueduc contre l'eau de l'amont est située à l'endroit où le fond est horizontal. A l'extrémité de l'aqueduc se trouve également une vanne analogue. Ces vannes subissent la charge de 20 m. de l'eau amont contre l'eau d'aval. Elle

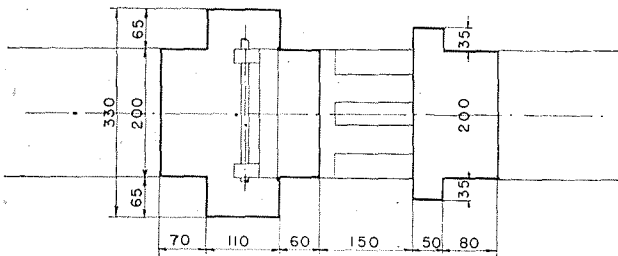
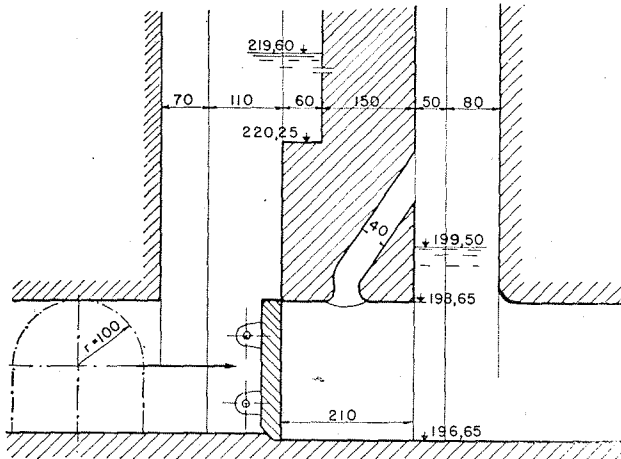


Fig. 29

Une partie de l'aqueduc de l'écluse à bateaux à Stechovice avec la vanne d'obturation

s'ouvre pour toute la hauteur de l'aqueduc, c'est-à-dire depuis $a = 0$ m. jusqu'à $a = 2$ m. L'ouverture est jusqu'à $a = 1$ m. un rectangle et de $a = 1$ m. à $a = 2$ m. un rectangle complété par la moitié de la surface d'un cercle.

Pour choisir la forme de la surface d'appui de cette vanne, il y a lieu de noter ce qui suit :

1) l'eau arrive à la vanne par l'aqueduc et cela avec une vitesse d'autant plus grande que l'élévation « a » de la vanne est plus grande.

2) l'écoulement de dessous de la vanne est à surface libre, puisque au commencement du remplissage du sas, la hauteur de 3 m. de l'eau aval dans le sas et les résistances correspondantes dans l'aqueduc et à la sortie ne suffisent pas pour créer un ressaut noyé ; dans la phase ultérieure du remplissage du sas il s'agit d'écoulement noyé.

3) l'ouverture au-dessous de la vanne a aussi

des contractions latérales, car le puits vertical de la vanne a une largeur plus grande, à savoir 3,30 m. que l'aqueduc qui n'a qu'une largeur de 2 m. et à partir de l'élévation de la vanne $a = 1$ m. et plus est ensuite de plus en plus étroit.

Ce sont des circonstances que la théorie et les essais précédents n'ont pas envisagées.

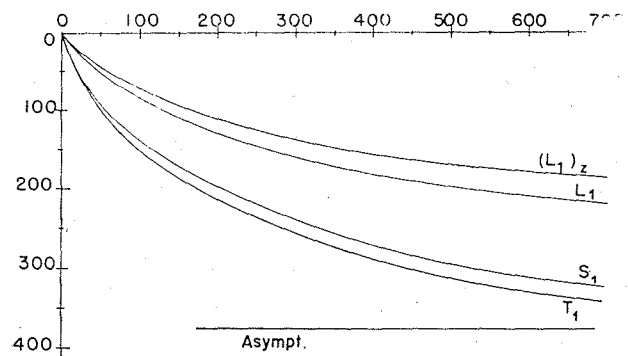


Fig. 30

Comparaison des diverses courbes d'écoulement.

Pour cette raison, il faut relever les courbes d'écoulement par des essais spéciaux. Dans ce but, il a été construit un modèle de l'aqueduc avec la vanne à l'échelle 1 : 10, installé dans le même canal dans lequel ont été faits les essais antérieurs. L'échelle a été choisie dans l'esprit de l'énoncé 26 afin d'éliminer de manière certaine pour la courbe directrice, l'influence d'écoulement d'une ouverture de faible hauteur. La courbe directrice est obtenue pour l'élévation de la vanne dans la réalité de 1 m., ce qui correspond dans le modèle à 1 : 10 à la hauteur 100 mm., cette dernière hauteur étant au-dessus de la limite de 60 mm.

Avec l'échelle de réduction 1/10, la hauteur du canal à l'amont de la vanne ne donne que la hauteur maximum de 1,60 m. au lieu de la hauteur nécessaire $20 : 10 = 2$ m.

Mais étant donné que le rapport h_1 est, dans ce cas, partout plus grand que 3,3, il est sans importance qu'on n'ait pas pu atteindre dans le modèle la charge de 2 m. derrière la vanne.

Essai 23

Évitons les contractions latérales pour les ouvertures au-dessous de la vanne allant jusqu'à la hauteur dans le modèle $a = 100$ mm. en ajustant le puits de la vanne aussi seulement à la largeur transversale de l'aqueduc, c'est-à-dire dans le modèle à $b = 0,2$ m.

La courbe d'écoulement relevée $L_{0,1}$ pour

$a = 0.1$ m. est ramenée à L_1 pour $a = 1$ m. et tracée sur la fig. 30.

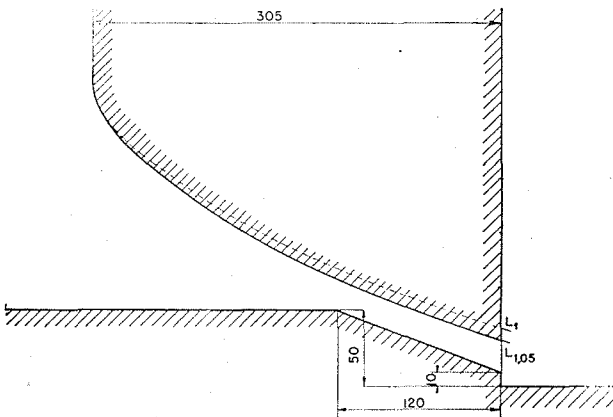


Fig. 31

Projet du seuil d'appui pour la vanne de l'aqueduc de l'écluse à bateaux à Stechovice.

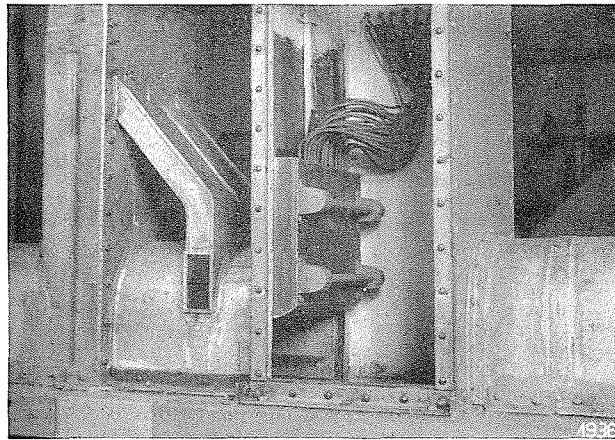


Fig. 32

Prise de pression sur la surface d'appui de la vanne pour l'aqueduc de l'écluse à bateaux à Stechovice.

Enoncé 37 : Etant donné que la vitesse d'arrivée dirige les filets de courant déjà avant la vanne dans la direction de sortie, cette vitesse détermine une contraction plus faible. La courbe L_1 passe bien au-dessus de la courbe S_1 .

Essai 24

Donnons au puits de la vanne du modèle une largeur de 0,34 m. correspondant à la réalité. L'écoulement au-dessous de la vanne se fait avec contraction latérale.

La courbe d'écoulement $(L)_z$ ramenée à $(L_1)_z$ figure également sur la fig. 30. On y a tracé aussi à la même échelle les courbes S_1 et T_1 afin de permettre la comparaison.

Pour le projet de la surface d'appui de la vanne de l'aqueduc de l'écluse de navigation à Stechovice, j'ai pris comme base en vue d'une sécurité encore plus grande la courbe $L_{1,05}$, fig. 31.

La largeur de la poutre d'appui en chêne est de 305 mm., ce qui est également toute la largeur de la vanne.

Le seuil fixe au-dessous de la vanne est adapté à la surface d'appui de la vanne. Pour la largeur d'appui de 120 mm., il est formé par un cadre en acier coulé bien poli.

Essai 25

La surface d'appui était constituée par de la tôle de laiton et soumise aussi à des essais sur modèle au 1 : 10. Pour mesurer la pression, elle était munie de piézomètres, fig. 32.

Les courbes de pression pour l'écoulement avec contraction latérale sont reproduites sur la fig. 33. On y a indiqué la répartition de la pression suivant la largeur de la poutre d'appui et cela au troisième, deuxième et premier sixième de la longueur de la poutre et à son commencement contre le mur ou suivant la fig. 33 dans les sections transversales a, b, c, d.

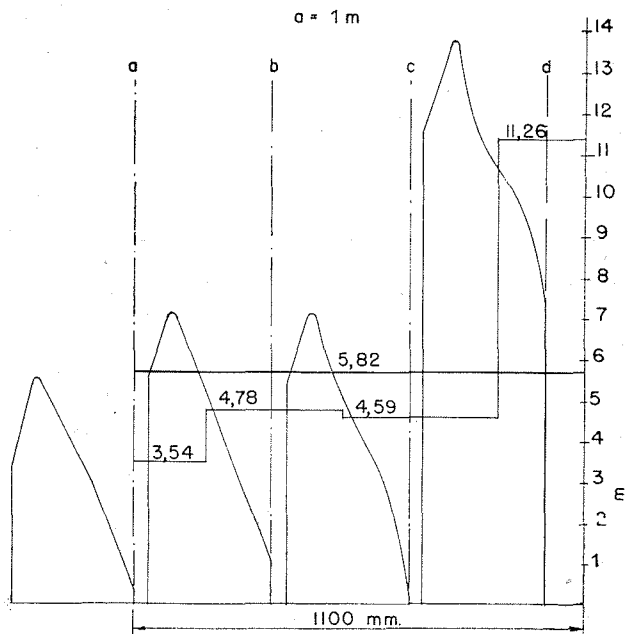


Fig. 33

Pressions sur la surface d'appui de la même vanne.

Etant donné que la vanne, comme le montre la fig. 29 se trouve devant l'ouverture de la sortie proprement dite et ses côtés latéraux provoquent

une contraction latérale, la pression sur la poutre diminue suivant sa longueur depuis les murs jusqu'au milieu. Au total, la poussée sur la poutre d'appui de la vanne est de 5,82 m. de colonne d'eau ou pour la surface $0,305 \times 2 \text{ m.} = 0,61 \text{ m}^2$ 3,55 tonnes. Comme il a été mentionné au paragraphe 4, la dépression pourrait atteindre sur cette surface plusieurs tonnes.

BIBLIOGRAPHIE

Ing. Dr. JAN SMETANA :

- 1) « Experimentalni studie vodniho skoku ». Zpr. ver. sl. techn., roc. 1933.
- 2) « Experimentalni studie vodniho skoku vzdutého ». Zpr. ver. sl. techn., roc. 1934.
- 3) « Types modernes de barrages mobiles ». Dimensions maxima atteintes dans chaque type. Dispositions à donner aux parties fixes et mobiles de ces barrages, et principes à suivre dans les manoeuvres pour réduire les affouillements au minimum. - Bruxelles, 1935.
- 4) « Studi sperimentali sul salto di Bidone libero e annessato ». « L'Energia Elettrica ». Fascicolo X, XIV, Ottobre 1937 - XV. Preklad od. A. Mr.
- 5) « Podobnost hydrodynamických jevu je-li vodni proud silne promisen strzenym vzduchem. Zpr. ver. sl. techn. roc. 1939. Téz. nemecky a francousky v publikaci uvedené ad. 8.
- 6) « Mechanicka podobnost v hydrodynamice ». Zpr. ver. sl. techn. roc. VIII - 1926 - c. 5-8.

7) « Dva priklady uziti racionelni teorie podjezi ». Zpr. Ver. sl. techn. roc. 1935.

8) « Remarque sur la forme du seuil fixe d'un barrage mobile ». Rapport sur la première réunion de l'Association Internationale de Recherches pour Travaux Hydrauliques - Stockholm - 1938.

Prof. Dr. Fr. KOLACEK :

9) « Hydrodynamika ». Nakl. Jednoty ceskych matematiku - 1899.

Prof. Dr. JAN VOJTECH :

10) « Zaklady matematiky ku studiu ved prirodnich a technickych ». Cast I à II.

WASSERBAUDIREKTOR MULLER, Dr. Ing. WITTE, HANNOVER, REGIERUNGSBAURAT ODENKITCHEN :

11) « Die eisernen Wehrverschlüsse des Weserwehres bei Dörverden » Die Bautechnik, 11 Jg. H 25, Berlin 16 VI. 1933.

Dr. Ing. Chr. KEUTNER :

12) « Wasserabführungsvermögen von scharfkantigen und abgerundeten Planschützen » - Die Bautechnik - 1932 - H. 21, u. 24.

13) Die Strömungsvermögen an unterströmten Schutztafeln mit scharfen und abgerundeten Unterkanten », Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, Bd 79, Nr 47,23. November 1935.

KOCH-CARSTANJEN :

14) « Bewegung des Wassers und dabei auftretende Kräfte » - Berlin 1926.

